

А.Г. СОСКОВ, д-р техн. наук,
Н.О. САБАЛАЕВА, аспирант

ПРИМЕНЕНИЕ ВАРИСТОРОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО КЛЮЧА ГИБРИДНЫХ КОНТАКТОРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ОТ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Проведен расчёт параметров защитной RC-цепи с варистором, ограничивающей коммутационные перенапряжения, возникающие в момент отключения электрических цепей гибридными контакторами переменного тока.

Проведено розрахунок параметрів захисного RC-кола з варистором, який обмежує комутаційні перенапруги, що виникають у момент відключення електричних кіл гібридними контакторами змінного струму.

Введение. При работе гибридных контакторов в цепях переменного тока к силовым полупроводниковым приборам (СПП) их полупроводниковых ключей (ПК) в момент выключения прикладываются коммутационные перенапряжения, обусловленные энергией, накопленной в индуктивных элементах питающей сети и самой нагрузки на момент размыкания цепи. Обычно для их ограничений используются защитные RC-цепи (снабберы).

В [1, 2] проведен детальный анализ способов ограничения коммутационных перенапряжений и скорости их нарастания с использованием RC-цепей. Однако, из-за применения в них специальных конденсаторов, рассчитанных на работу при переменном напряжении высокого уровня и имеющих относительно большую ёмкость (до 2 мкФ), существенно повышаются стоимость и габариты ПК гибридного контактора, при этом уровень коммутационных перенапряжений остаётся достаточно высоким.

В этой связи предлагается использовать дополнительно с защитной RC-цепью ещё и нелинейный ограничитель перенапряжений (ОПН), в качестве которого может быть использован варистор или встречно включенные стабилитроны. Это позволит существенно снизить ёмкость конденсатора при обеспечении приемлемого уровня перенапряжений, а также повысить устойчивость схемы к воздействиям внешних перенапряжений. В настоящее время наиболее энергоёмкими являются ОПН на основе оксидно-цинковых варисторов (CH2-2, РНС-60) [1]. Такие приборы имеют высокое быстродействие и нелинейную вольт-амперную характеристику (ВАХ), обеспечивающую эффективную защиту ПК от

перенапряжений на заданном уровне за счёт поглощения значительной дозы энергии, накопленной в индуктивности отключаемой сети. В случае ПК, состоящего из двух встречно-параллельно подключенных тиристоров, наиболее целесообразно включать варистор параллельно защитной RC-цепи (рис. 1).

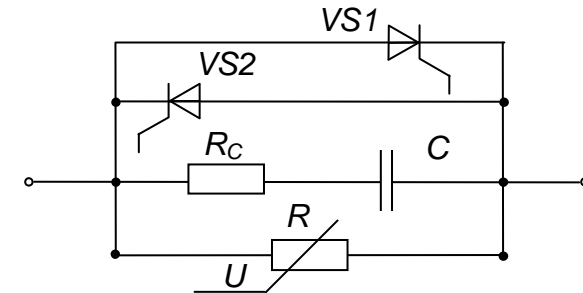


Рис. 1. Вариант защитной RC-цепи с варистором

Достоинствами предлагаемого варисторного ОПН являются простота схемной реализации, малые габариты и масса, улучшенные защитные характеристики (стабильность уровня ограничения перенапряжения и протекания тока через ОПН только на стадии ограничения перенапряжения), низкая стоимость.

Расчёт параметров защитной RC-цепи с использованием варисторного ОПН. Анализ процесса ограничения перенапряжений на ПК варисторным ОПН (CH2-2) рассмотрим с помощью эквивалентной расчётной схемы (рис. 2), которая является модификацией схемы (рис. 1).

При расчёте защитных характеристик варистора CH2-2 обычно аппроксимируют его ВАХ с достаточной для инженерных расчётов точностью (погрешность менее 10 %) выражением [3]:

$$U_{\text{с}} = U_{\text{см}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{с}}$ – напряжение на варисторе.

При этом $U_{\text{см}}$ варистора выбирается с учётом следующих условий [3]:

$$U_{\text{см}} = (1,5 - 2)U_{\text{фМ}}k \geq E; \quad (2)$$

$$U_{\text{фМ}}k \geq 0,85U_{\text{кл}}, \quad (3)$$

где $U_{\text{кл}}$ – классификационное напряжение варистора, равное напряжению на нём при токе 1 мА.

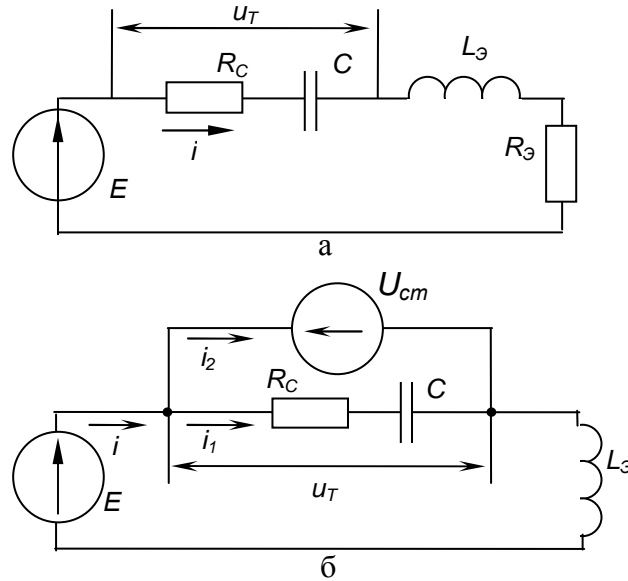


Рис. 2. Эквивалентная расчётная схема защитной RC-цепи с варистором в процессе отключения тиристора (а – до пробоя варистора, б – при пробое варистора)

($R_Э$ и $L_Э$ – эквивалентные сопротивление и индуктивность размыкаемой цепи, U_{cm} – напряжение на варисторе при протекании токов, близких к коммутируемому, u_T – напряжение на тиристоре, E – восстанавливающееся напряжение, R_C и C – сопротивление и ёмкость защитной RC-цепи)

Анализ показывает, что варистор СН2-2-470 В при линейном напряжении сети $U_{Л} = 380$ В ($k = 1,1$) и трёхфазной схеме силового гибридного ключа без нулевого провода наиболее полно удовлетворяет поставленным выше условиям.

До пробоя варистора ($i_2 = 0$) переходный процесс в рассматриваемой схеме (рис. 2, а) описывается уравнением (4) и все его решения, приведенные в [2], могут быть использованы для расчетов на этом этапе.

$$L_Э \frac{di}{dt} + R_C i + \frac{1}{C} \int i dt = E \quad (4)$$

где $E = kU_{Эм} \cdot \sin \varphi$; $u_T = R_C i + \frac{1}{C} \int i dt$;

$k = \frac{U_\phi}{U_{\text{ном}}}$ – величина отклонения фазного напряжения от номинального.

Переходный процесс в рассматриваемой расчётной схеме при пробое варистора (рис. 2, б) описывается следующей системой уравнений [4]:

$$\begin{cases} L_Э \frac{di}{dt} = E - U_{cm} \\ i_1 R_C + \frac{1}{C} \int i_1 dt = U_{cm} \\ i = i_1 + i_2 \end{cases} \quad (5)$$

или после преобразований

$$\begin{cases} L_Э \frac{di}{dt} = E - U_{cm} \\ R_C C \frac{di_1}{dt} + i_1 = 0, \\ i = i_1 + i_2 \end{cases} \quad (6)$$

В этой связи начальные условия для решения системы уравнений (6) будут определяться в момент времени t_0 , при котором напряжение на тиристоре $u_T(t)$ достигает напряжения U_{cm} , т.е., решая уравнение $u_T(t_0) = U_{cm}$.

Для примера ниже даны начальные условия для колебательного процесса [2]:

$$i(0) = i_1(0) = I_0 = \left[I_{RM} \cos \omega_{св} t_0 + \frac{E - R_C I_{RM}}{\omega_{св} L_Э} \left(1 + \frac{\alpha k_1}{\omega_0} \right) \sin \omega_{св} t_0 \right] e^{-\alpha t_0}, \quad (7)$$

где I_{RM} – амплитуда обратного тока через тиристор [2];

$$\alpha = \frac{R_C}{2L_Э}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{CL_Э}}, \quad \omega_{св} = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}, \quad k_1 = \frac{I_{RM} \cdot L_Э \cdot \omega_0}{E - I_{RM} \cdot R_C}.$$

Время t_0 находится из уравнения

$$U_{cm} = E - (E - R_C I_{RM}) e^{-\alpha_0} \left[\cos \omega_{c\phi} t_0 - \frac{\alpha + \omega_0 k_1}{\omega_{c\phi}} \sin \omega_{c\phi} t_0 \right]; \quad (8)$$

$$U_C(0) = U_{cm} - I_0 R_C; \quad (9)$$

$$\frac{di}{dt}(0) = \frac{E - U_{cm}}{L_{\mathcal{C}}}. \quad (10)$$

Аналогично можно записать начальные условия и для других видов переходного процесса [2].

После преобразований получим следующее решение системы (6)

$$i_1 = I_0 e^{-t/\tau}, \quad (11)$$

$$i_2 = \frac{E - U_{cm}}{L_{\mathcal{C}}} t + I_0 (1 - e^{-t/\tau}), \quad (12)$$

где $\tau = R_C C$.

Максимальное значение тока варистора I_{2m} определяется из выражения

$$I_{2m} = \frac{E - U_{cm}}{L_{\mathcal{C}}} t_m + I_0 (1 - e^{-t_m/\tau}) \quad (13),$$

где $t_m = \tau \ln \frac{L_{\mathcal{C}} I_0}{(U_{cm} - E)\tau}$ – время, при котором значение тока через

варистор i_2 максимально.

Зная величину I_{2m} , мы сможем определить с помощью ВАХ варистора СН2-2 (см., например, [3]) напряжение на нём $U_{\phi m}$, которое и будет соответствовать максимальному перенапряжению на тиристоре ПК ($U_{T \max}$), т.е. $\frac{U_{T \max}}{E} = \frac{U_{\phi m}}{E}$.

Значение $U_{\phi m}$, мы также можем определить, воспользовавшись следующей аналитической зависимостью, с высокой степенью точности, аппроксимирующей ВАХ варистора [3]

$$I_{2m} = a U_{2m}^{\alpha},$$

где $\alpha = \frac{2,3}{\ln\left(\frac{U_{10}}{U_{кл}}\right)}$ – коэффициент нелинейности (U_{10} – напряжение

при токе 10 мА), значение которого для варисторов типа СН2-2 лежит в диапазоне (32 – 34);

a – постоянная, значение которой зависит от размеров варистора (для СН2-2 $a = 5 \cdot 10^{-34}$).

Анализ результатов расчёта $\frac{du_T}{dt}$ на временном интервале $(0 - t_0)$,

показывает, что $\frac{du_T}{dt}$ на этом отрезке изменяется незначительно. Поэтому

наиболее целесообразно максимальное значение $\frac{du_T}{dt}$ находить на уровне

$U_T = U_{cm}$, где воздействие на тиристор этого фактора максимально [1].

Для колебательного процесса максимальная скорость нарастания напряжения на тиристоре [1, 2]

$$\left(\frac{du_T}{dt} \right)_{\max} = (E - R_C I_{RM}) e^{-\alpha_0} \times \left((2\alpha + \omega_0 k_1) \cos \omega_{c\phi} t_0 + \frac{\omega_{c\phi}^2 - \alpha(\alpha + \omega_0 k_1)}{\omega_{c\phi}} \cdot \sin \omega_{c\phi} t_0 \right), \quad (14)$$

при этом R_C должно находиться в диапазоне $0 < R_C < \frac{E}{I_{RM}}$.

И наконец, энергия, выделяемая в варисторе при перенапряжениях, находится из выражения

$$W = \int_0^{t_1} i_2 U_C dt = \frac{E - U_{cm}}{L_{\mathcal{C}}} U_{cm} \frac{t_1^2}{2} + I_0 U_{cm} (t_1 + \tau e^{-t_1/\tau}), \quad (15)$$

где t_1 – время, при котором ток через варистор i_2 меняет знак, находится из уравнения

$$\frac{E - U_{cm}}{L_{\mathcal{C}}} t_1 + (1 - e^{-t_1/\tau}) I_0 = 0. \quad (16)$$

Результаты расчётов, выполненных на ПЭВМ в среде Mathcad с помощью предложенной выше методики приведены для гибридных контакторов на номинальное напряжение 380 В и разные номинальные токи (трёхфазное без нулевого провода исполнение ПК) в табл.1. При этом рассматривался худший случай, когда контактор коммутировал предельный ток ($I = 10I_{ном}$), $\cos \varphi = 0,3$.

Таблица 1. Результаты расчётов параметров защитной RC-цепи с применением варисторов.

Ном. ток контактора, А	Тип тиристора и его класс	Тип варистора	Параметры RC-цепи		$\frac{U_{Tmax}}{E}$	$\left(\frac{du_T}{dt}\right)_{max}$ В/мкс	W, Дж
			R_c , Ом	C , мкФ			
160	T161-160-7	CH2-2-470B	22,0	0,05	1,19	217,0	0,30
250	T171-250-7	CH2-2-470B	15,0	0,1	1,18	184,0	0,48
400	T143-400-7	CH2-2-470B	10,0	0,15	1,23	304,0	1,46
630	T153-630-7	CH2-2-470B	5,1	0,22	1,25	320,0	1,76

Выводы. Проведенные исследования и анализ результатов расчёта параметров ОПН показали, что совместное применение защитной RC-цепи и варистора позволяет по сравнению с традиционной схемой защиты уменьшить ёмкость конденсатора до десяти раз, а значит и результирующий ток утечки в отключенном состоянии аппарата, понизить класс используемых в контакторах СПП (например, в сетях 380 В с десятого до седьмого), а также существенно (до 30 %) понизить уровень коммутационных перенапряжений. Применение же малогабаритного и недорогого варистора, работающего в облегчённом режиме, практически не снижает надёжность работы устройства и его массогабаритные и стоимостные показатели.

Список литературы: 1. Сосков А.Г., Соскова И.А. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита – К: Каравелла, 2005 – 344 с. 2. Сосков А.Г., Сабалаева Н.О., Соскова И.А. Исследование коммутационных перенапряжений при коммутировании цепей переменного тока гибридными контакторами. Світлотехніка та електроенергетика. – Харків: ХДАМГ, 2009. – № 1. С. 34 – 40. 3. Могилевский Г.В. Гибридные электрические аппараты низкого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 2 с. 4. Зевеке Г.В., Ионкин П.А. и др. Основы теории цепей. Учебник для вузов – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.